球孢白僵菌侵染对管氏肿腿蜂雌成蜂的不利影响

杨清碰，李　莉*

（贵州师范大学生命科学学院，贵阳 550025）

摘要：【目的】本研究旨在探究球孢白僵菌 *Beauveria bassiana* 对管氏肿腿蜂 *Scleroderma guani* 雌成蜂的不利影响，为今后利用管氏肿腿蜂携带球孢白僵菌联合防控松墨天牛 *Monochamus alternatus* 等蛀干害虫的技术研发奠定基础。【方法】本实验测定了 5 种不同浓度的球孢白僵菌孢悬液（$1.0 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^8$ 孢子/mL）和孢子粉（1.0×10^7 孢子/雌）（以无菌水为对照）对雌成蜂的侵染力和致死力的影响。【结果】球孢白僵菌的孢悬液和孢子粉均会感染雌成蜂，不同浓度孢悬液接种于雌成蜂体表时，孢悬液对雌成蜂的感染率和致死率均与孢悬液浓度呈正相关性。接菌第 2 和 4 天，仅最高浓度孢悬液对雌成蜂有致死和感染现象；第 5 天，1.0×10^8，1.0×10^6 和 1.0×10^4 孢子/mL 孢悬液对雌成蜂的感染率分别为 56.0%，8.0% 和 4.0%，致死率分别为 88.0%，44.0% 和 16.0%；第 6 天，1.0×10^8 孢子/mL 孢悬液对雌成蜂的致死率高达 100%，是最低浓度孢悬液对雌成蜂致死率的 6.25 倍。同时，孢悬液和孢子粉（含相同孢子数）相比，前者对雌成蜂的致死率更高；接菌第 7 天，孢悬液（1.0×10^7 孢子/mL）对雌成蜂的致死率为 100%，是孢子粉的 3.12 倍。这可能与雌成蜂对孢子粉有一定的清理或抖落行为有关。【结论】今后在利用管氏肿腿蜂携菌防控天牛等蛀干害虫时，可优先选用球孢白僵菌孢悬液，并控制雌成蜂携菌后及时释放，以便在其感染潜伏期 4 ~ 5 d 以内，有效传至天牛蛹室。

关键词：管氏肿腿蜂；蛀干害虫；球孢白僵菌；感染率；致病性；死亡率

中图分类号：Q965.8　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：0454-6296(2017)01-0053-07

Negative influence of *Beauveria bassiana* infection on female adults of a cryptoparasitoid *Scleroderma guani* (Hymenoptera: Bethylidae)

YANG Qing-Peng, LI Li* (College of Life Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China)

Abstract: 【Aim】 This study aims to explore the negative influence of *Beauveria bassiana* on female adults of a cryptoparasitoid *Scleroderma guani*, so as to more effectively prevent and control the pine longicorm beetle, *Monochamus alternatus*. 【Methods】 The pathogenicity of *B. bassiana* to *S. guani* was tested with different concentrations of spore suspension ($1.0 \times 10^4 - 1.0 \times 10^8$ conidia/mL) and spore powder (1.0×10^7 conidia/female) with sterile water as the control. 【Results】 The female adults of *S. guani* were infected by both spore suspension and spore powder of *B. bassiana*. After inoculation with different concentrations of spore suspension, both the infection rate and mortality rate of female adults of *S. guani* showed a positive correlation with spore concentration. At 2 and 4 d after inoculation, only the highest concentration of spore suspension caused the death and infection in female adults of *S. guani*. At 5 d after inoculation, the infection rates of female adults of *S. guani* by 1.0×10^8, 1.0×10^6 and 1.0×10^4 conidia/mL spore suspension were 56.0%, 8.0% and 4.0%, respectively, and the mortality rates were 88.0%, 44.0% and 16.0%, respectively. At 6 d after inoculation, the mortality rate of female

基金项目：国家自然科学基金项目(31360519)；贵州省科技厅农业攻关项目(黔科合 NY[2013]3041 号)；贵州省林业厅科学技术项目(黔林科合[2014]02 号)

作者简介：杨清碰，女，1990 年生，贵州兴义人，本科生，研究方向为害虫的生物防治，E-mail：yangqingpeng1992@163.com

* 通讯作者 Corresponding author, E-mail：lilee001@126.com

收稿日期 Received：2016-08-02；接受日期 Accepted：2016-12-19

adults of *S. guani* caused by 1.0×10^8 conidia/mL spore suspension reached 100%. The spore suspension had stronger capability causing death of female adults of *S. guani* than the spore powder. At 7 d after inoculation, the mortality rate of female adults of *S. guani* inoculated with 1.0×10^7 conidia/mL spore suspension was 100%. This was likely to be related to the behavior of female adults of *S. guani*. 【Conclusion】 Spore suspension of *B. bassiana* should preferably be applied in the comprehensive prevention and control of stem borers using pathogen-infected *S. guani*. And the release time of *S. guani* parasitoids after pathogen infection should be controlled so as to facilitate to spread the fungal conidia and to infect larvae and pupae of stem borers within its latent period (4 – 5 d) infected by *B. bassiana*.

Key words: *Scleroderma guani*; stem borer; *Beauveria bassiana*; infection rate; pathogenicity; mortality rate

管氏肿腿蜂 *Scleroderma guani* Xiao *et* Wu 隶属肿腿蜂科(Bethylidae),是主要以鞘翅目、鳞翅目等多种蛀干害虫为寄主的体外寄生蜂,其雌成蜂善于爬行,搜索寄主能力强。管氏肿腿蜂是防治天牛类等林业钻蛀性害虫的有效天敌,具有重要的生物防治利用价值(胡尊瑞等, 2014)。尤其用于防治松墨天牛 *Monochamus alternatus* Hope[天牛科(Cerambycidae)],以有效阻断松材线虫 *Bursaphelenchus xylophilus*[滑刃科(Aphelenchoididae)]的传播途径(李建庆等, 2006)。据报道,2011 年松材线虫病对我国造成的直接经济损失高达 25 亿元,间接经济损失达 250 亿元,目前该数据仍持上升趋势(林孝春, 2015)。目前,防治松墨天牛的方法主要有生物防治、化学防治和物理防治等。其中,利用天敌昆虫管氏肿腿蜂、天敌微生物球孢白僵菌 *Beauveria bassiana* 等天敌是野外常用的生物防治方法(张龙渊和张旭晓, 2011),已取得了一定成效。另外,这两种天敌对寄主都有一定的选择性和专化性,对高等动植物无毒害作用且不会造成环境污染,在林业害虫防治中备受关注(刘洪剑等, 2007)。但是,在实际应用中,利用管氏肿腿蜂、球孢白僵菌的防治效果受多种环境因子影响,例如降雨等恶劣天气、施药时和施药后的温度、湿度及风等因子的影响,故使用效果不稳定,不同区域的施药效果也有所不同,甚至有的药剂在施用过程中很有可能接触不到虫体,难以达到预期防效(徐克勤等, 2002)。借助管氏肿腿蜂携带球孢白僵菌联合防控天牛的方法是生物防治方法中的新思路之一,即通过善于钻蛀的昆虫载体将昆虫病原微生物传入隐蔽性栖息习性的害虫蛹室中,从而更加有的放矢地防控天牛等蛀干害虫的幼虫和蛹。有研究表明,这种联合寄生的方法高于单独使用任一方法的防治效果(王功桂等, 2004; 刘洪剑等, 2007)。

然而,球孢白僵菌是广谱性的昆虫病原微生物,管氏肿腿蜂携带球孢白僵菌寄生天牛的同时,也会遭受球孢白僵菌的侵染(王四宝等, 2003)。如何更好地介入球孢白僵菌达到有效防控天牛等蛀干类害虫是该防治方法的关键技术之一,而明确球孢白僵菌对管氏肿腿蜂的侵染影响是重要前提。因此,本研究以"球孢白僵菌-管氏肿腿蜂"为研究对象,试图探究球孢白僵菌对管氏肿腿蜂雌成蜂的侵染影响,并推测球孢白僵菌侵染雌成蜂的时间、部位,以及致死情况等,为今后利用管氏肿腿蜂携带球孢白僵菌联合防控钻蛀性蛀干害虫奠定基础。

1 材料与方法

1.1 供试生物

管氏肿腿蜂由本实验室用松墨天牛幼虫续代饲养(>7 代),以获得稳定的供试蜂实验种群,选取羽化后 5 – 6 d、已交配的雌成蜂作为供试蜂;球孢白僵菌孢子粉由贵州大学生命科学学院真菌资源实验室提供。

1.2 仪器和试剂

鼓风干燥箱(JC101 型,上海成顺仪器仪表有限公司、南通嘉程仪器有限公司合作出品),灭菌锅(BXM-30R,上海博迅实业有限公司医疗设备厂),光照培养箱(RXZ 智能型,宁波江南仪器厂),冰箱(BCD-290W,青岛海尔股份有限公司),玻璃试管(12 mm × 75 mm),培养皿(30 mm × 10 mm)以及棉塞、小毛笔、白瓷盘、镊子、烧杯、纱布、纸巾、试管刷、记号笔、蒸馏水、无菌水、75% 酒精(贵州利键消毒制品有限公司)。

1.3 不同浓度的孢悬液对雌成蜂的影响

首先选取个体较大、羽化后 5 – 6 d 且已交配的管氏肿腿蜂雌成蜂作为供试蜂(150 头);其次用球孢白僵菌孢子粉和无菌水配成 5 个浓度的孢悬液:1.0×10^8, 1.0×10^7, 1.0×10^6, 1.0×10^5 和 1.0×10^4 孢子/mL。然后配制 10% 的蜂蜜水(10 mL)待用。

分别取 60 μL 的蜂蜜水（作为蜂的食物）和孢悬液（60 μL）放在同一个培养皿（10 mm × 30 mm）中（以培养皿中轴为界，对称放置 A 处：蜂蜜水，B 处：孢悬液），每个浓度 25 个重复，以无菌水为对照（A 处：蜂蜜水，B 处：无菌水）。生测时，先将管氏肿腿蜂雌成蜂（1 头）放在此培养皿中，用封口膜将培养皿封好（总共 150 个培养皿，25 个/组），标记，放入光照培养箱（温度 26 ± 0.5℃，RH 65%，光周期 12L∶12D）中。随后进行观察，观察时间从将管氏肿腿蜂雌成蜂放入培养皿中开始，每隔 12 h 观察一次。记录和分析供试蜂被放入培养皿中后的存活天数，其体表长出白僵菌所需天数；计算供试蜂的感染率（= 感染蜂数/供试蜂总数）和死亡率（= 供试蜂死亡数/供试蜂总数）。

1.4　孢子粉和孢悬液对雌成蜂的影响比较

选取状态同 1.3 节的雌成蜂 75 头。将孢子粉均匀放在培养皿中，让管氏肿腿蜂雌成蜂（1 头）在其上爬行 15 min 后（经估算，平均每头蜂附着孢子数约为 1.0×10^7 孢子）。然后，将携菌雌成蜂取出，放在有蜂蜜水（60 μL，作为蜂的食物）的干净培养皿中，用封口膜将培养皿封好（25 个重复）。其次，分别取蜂蜜水（60 μL，作为蜂的食物）、浓度为 1.0×10^7 孢子/mL 孢悬液（60 μL）放在同一个培养皿中。将管氏肿腿蜂雌成蜂（1 头）放在此培养皿中，用封口膜将培养皿封好（25 个重复）；以无菌水作为对照。标记，放入光照培养箱。随后进行观察、记录和比较分析孢子粉和孢悬液对雌成蜂的影响，观察时间从将蜂放入培养皿中开始（12 h/次）。记录和比较生物学参数同 1.3 节。

1.5　数据统计分析

运用 Excel 记录整理数据，数据分析采用统计软件 SPSS 18.0（SPSS Inc.，Chicago，IL，USA）。利用 K-S 方法检验数据是否符合正态分布；利用单因素方差分析（ANOVA）比较不同浓度的球孢白僵菌孢悬液对管氏肿腿蜂雌成蜂的感染率和致死率，以及无菌水、相同孢子数的孢子粉和孢悬液对管氏肿腿蜂雌成蜂的致死率。

2　结果

2.1　比较不同浓度球孢白僵菌孢悬液对管氏肿腿蜂雌成蜂的影响

2.1.1　不同浓度孢悬液对雌成蜂的感染现象：接菌前，管氏肿腿蜂雌成蜂的体表为黑色，接菌后 5 ~ 7 d 内体表渐渐长出球孢白僵菌菌丝；球孢白僵菌孢悬液浓度越大，菌丝生长越明显（图 1）。观察结果显示，接菌后第 4 天，最高浓度孢悬液（1.0×10^8 孢子/mL）开始感染雌成蜂，第 10 天感染率达 100%；接菌后第 5 天，最低浓度（1.0×10^4 孢子/mL）才开始感染雌成蜂，直到第 25 天感染率才增至 72%。

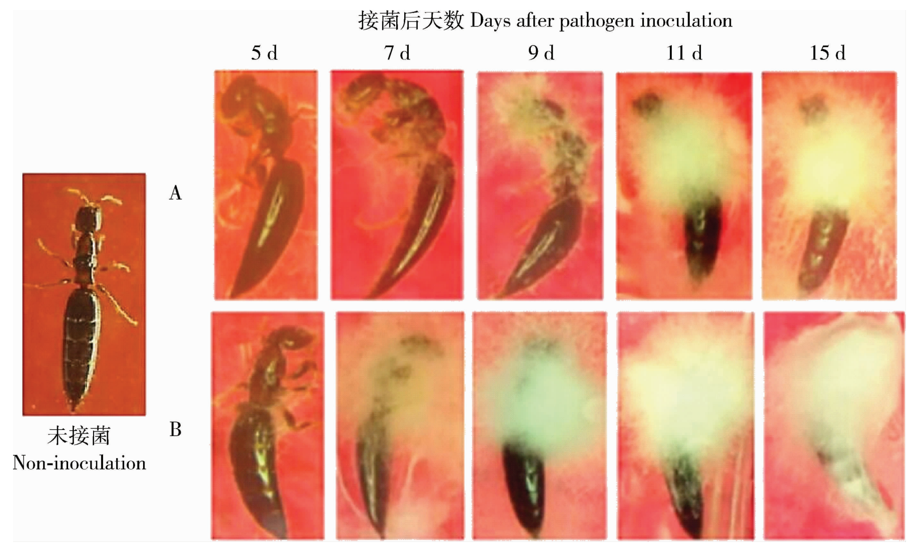


图 1　不同浓度球孢白僵菌孢悬液对管氏肿腿蜂雌成蜂的感染情况

Fig. 1　Infection of *Beauveria bassiana* spore suspension at different concentrations to female adults of *Scleroderma guani*

A：1.0×10^7 conidia/mL；B：1.0×10^8 conidia/mL.

2.1.2　不同浓度孢悬液对雌成蜂的感染率：不同浓度的孢悬液对雌成蜂的感染率总体上存在显著差异（图 2：A）（5 d，$F_{5,24} = 15.000$，$P < 0.01$）。浓度为 1.0×10^8 孢子/mL 与 1.0×10^4 ~ 1.0×10^7 孢子/mL

的孢悬液对此雌成蜂的感染率不同,其中 1.0×10^8 孢子/mL 的感染率为 56.0%, 1.0×10^5 和 1.0×10^4 孢子/mL 的感染率都为 4.0%(图 2:B)(7 d, $F_{5,24}=18.038$, $P<0.01$)。比较接菌后 7 d 和 5 d 的感染率,不同浓度下的孢悬液对雌成蜂的感染率都有所增加,其中 1.0×10^7 孢子/mL 的孢悬液与 1.0×10^8 和 1.0×10^6 孢子/mL 的孢悬液对蜂的感染率无显著差异。第 10 天($F_{5,24}=48.133$, $P<0.01$),最高浓度(1.0×10^8 孢子/mL)的孢悬液对蜂的感染率为 100%,最低浓度(1.0×10^4 孢子/mL)为 36.0%,

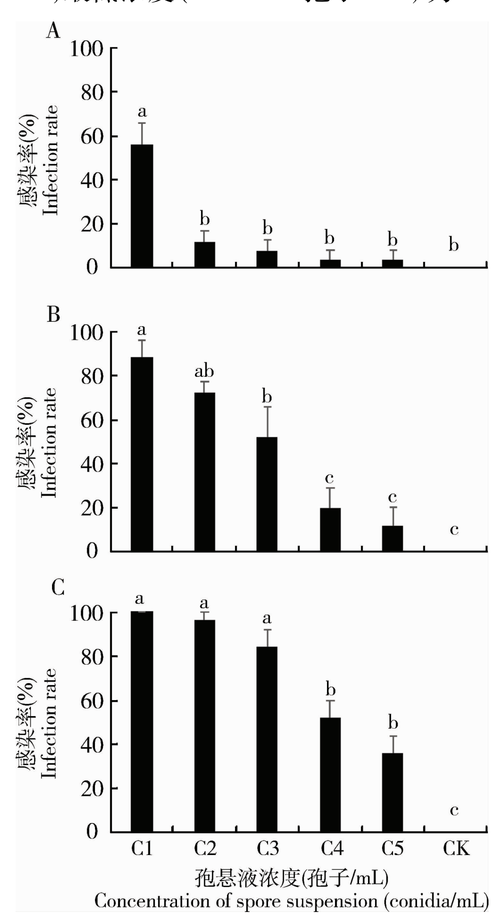


图 2 比较不同浓度白僵菌孢悬液对管氏肿腿蜂雌成蜂的感染率

Fig. 2 Comparison of the infection rate of *Beauveria bassiana* spore suspension at different concentrations to female parasitoids of *Scleroderma guani*

A: 接种后 5 d (5 d after inoculation); B: 接种后 7 d (7 d after inoculation); C: 接种后 10 d (10 d after inoculation). C1: 1.0×10^8 conidia/mL; C2: 1.0×10^7 conidia/mL; C3: 1.0×10^6 conidia/mL; C4: 1.0×10^5 conidia/mL; C5: 1.0×10^4 conidia/mL; CK: 无菌水(对照) Sterile water (Control). 图中数据为平均值 ± 标准误;柱形图上不同字母示不同处理间差异显著(ANOVA, $P<0.05$)。Data in the figure are represented as mean ± *SE*. Different letters on bars indicate significant differences (ANOVA, $P<0.05$) among different treatments.

前者是后者的 2.78 倍。

2.1.3 不同浓度孢悬液对雌成蜂死亡率的影响:不同浓度的球孢白僵菌孢悬液对管氏肿腿蜂雌成蜂的致死率情况不同。接菌后第 5 天(图 3:A)($F_{5,24}=24.497$, $P<0.01$), 1.0×10^8 孢子/mL 孢悬液对雌成蜂的致死率最高,为 88.0%,而 1.0×10^4 孢子/mL 孢悬液的致死率仅为 16.0%。随着时间的增加,孢悬液对雌成蜂的致死率也在增加(图 3:B)(7 d, $F_{5,24}=53.124$, $P<0.01$), 1.0×10^7 孢子/mL 的孢悬液对雌蜂的致死率从第 5 天的 48.0% 增加至 100.0%, 1.0×10^4 孢子/mL 和 1.0×10^5 孢子/mL 的致死率从第 5 天的 16.0% 分别增加到 52.0% 和 36.0%。由图 3(C)可见,接菌第 10 天, 1.0×10^6 孢子/mL 的孢悬液对雌成蜂的致死率为 100%,对照组仅为 4.0%($F_{5,24}=82.000$, $P<0.01$)。

2.2 比较球孢白僵菌孢子粉和孢悬液对雌成蜂的影响

球孢白僵菌孢子粉(平均每头蜂附着孢子数约为 1.0×10^7 孢子/雌)、孢悬液(1.0×10^7 孢子/mL)对管氏肿腿蜂致死情况比较见表 1。总体上看,接菌后第 3-4 天,孢子粉、孢悬液和无菌水对雌成蜂蜂致死率的差异不明显(3 d, $F_{2,12}=1.333$, $P>0.05$; 4 d, $F_{2,12}=2.400$, $P>0.05$)。但是,接菌后第 5 天,孢悬液对雌成蜂的致死率明显高于孢子粉($F_{2,12}=18.600$, $P<0.01$)。接菌第 7 天,孢悬液、孢子粉对雌成蜂的致死率存在明显差异($F_{2,12}=142.333$, $P<0.01$)。其中,孢悬液对雌成蜂的致死率为 100%,而孢子粉对雌成蜂的致死率仅为 32.0%。

3 讨论

室内实验表明,球孢白僵菌孢悬液和孢子粉对管氏肿腿蜂雌成蜂有一定侵染力和致病力。通过对比不同浓度孢悬液对管氏肿腿蜂雌成蜂的感染、致死情况发现,孢悬液对雌成蜂的感染率、致死率随孢悬液浓度升高而增加。当浓度为 1.0×10^8 孢子/mL 时,对雌成蜂的感染速度最快、致病力最强。就相同孢子数的孢悬液和孢子粉对雌成蜂致死率作比较,孢悬液总体上对雌成蜂的致死率高于孢子粉,这可能是因为雌成蜂体表和附肢表面较为光滑、不易附着孢子粉;此外,该寄生蜂善于爬行、钻蛀,具有清理自身及栖境的行为特点,都有可能造成其体表孢子粉的抖落和数量减少(贺凯等, 2006; Li *et al.*, 2015)。

表 1　球孢白僵菌孢子粉和孢悬液对管氏肿腿蜂雌成蜂的致死率比较

Table 1　Comparison of the influence of *Beauveria bassiana* spore powder (1.0 ×10^{7} conidia/female) and spore suspension (1.0 ×10^{7} conidia/mL) on the mortality rate of female adults of *Scleroderma guani*

处理 Treatment	接种后不同天数的死亡率 Mortality rate at different days after inoculation (%)				
	3 d	4 d	5 d	6 d	7 d
孢子粉 Conidia powder	8.000 ±4.899 a	12.000 ±4.899 a	20.000 ±6.325 b	24.000 ±7.483 b	32.000 ±4.899 b
孢悬液 Conidia suspension	8.000 ±4.899 a	20.000 ±6.325 a	48.000 ±4.899 a	92.000 ±4.899 a	100.000 ±0.000 a
无菌水(CK) Sterile water	5.333 ±2.364 a	4.000 ±8.944 a	4.000 ±8.944 c	4.000 ±4.000 c	8.000 ±4.899 c

表中数据为平均值 ± 标准误；同列数据后不同字母表示显著差异(ANOVA, $P<0.05$)。Data in the table are represented as mean ± *SE*. Different letters following the data in the same column indicate significant differences (ANOVA, $P<0.05$).

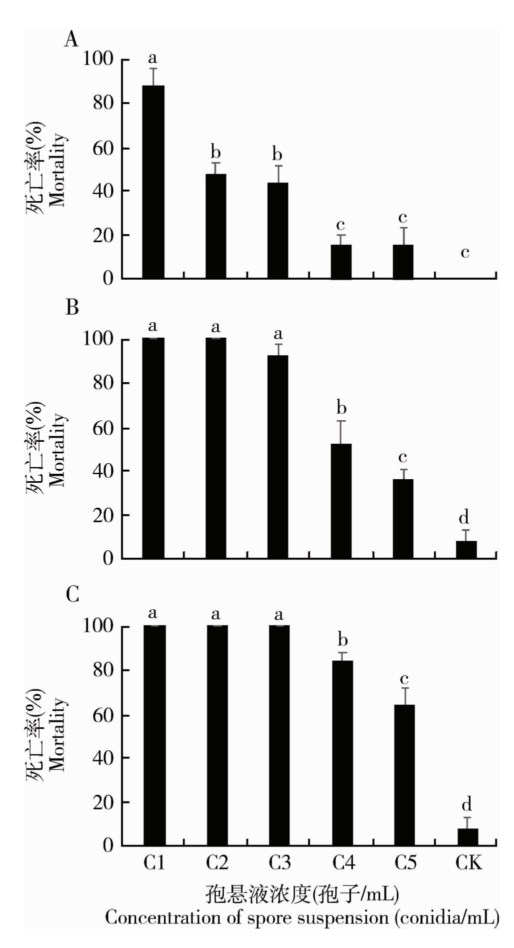


图 3　比较不同浓度孢悬液对管氏肿腿蜂雌成蜂死亡率的影响

Fig. 3　Comparison of the effects of *Beauveria bassiana* spore suspension at different concentrations on the mortality of female adults of *Scleroderma guani*

A：接种后 5 d (5 d after inoculation)；B：接种后 7 d (7 d after inoculation)；C：接种后 10 d (10 d after inoculation). C1：1.0 ×10^{8} conidia/mL；C2：1.0 ×10^{7} conidia/mL；C3：1.0 ×10^{6} conidia/mL；C4：1.0 ×10^{5} conidia/mL；C5：1.0 ×10^{4} conidia/mL；CK：无菌水(对照) Sterile water (Control). 图中数据为平均值 ± 标准误；柱形图上不同字母示不同处理间差异显著(ANOVA, $P<0.05$)。Data in the figure are represented as mean ± *SE*. Different letters on bars indicate significant differences (ANOVA, $P<0.05$) among different treatments.

许多研究表明，昆虫病原微生物侵染昆虫个体的程度与昆虫自身的生物学习性密切相关，尤其是昆虫个体的形态、行为、生理和发育(农向群和张泽华, 2013)。管氏肿腿蜂也不例外，该蜂同其他寄生蜂一样，有频繁地清理身体表面、附肢摩擦和搬运子代远离寄主残骸等一系列行为表现，尤其是在其搜索和利用寄主的过程中(贺凯等, 2006; Li *et al.*, 2015)。实验观察发现，当管氏肿腿蜂雌成蜂触碰或附着孢子粉后，会通过摆尾、拱背、摩擦足或以后足摩擦腹部表面等一系列行为将球孢白僵菌分抖落，从而清除或减少雌成蜂体表的菌粉附着量，相比之下，孢悬液则不易被蜂清理。这也许是孢悬液侵染雌成蜂效果较好的原因之一，但其侵染机制还有待进一步验证。据此，建议今后在利用管氏肿腿蜂携菌寄生天牛的联防技术中，可以优先选用球孢白僵菌孢悬液，并在其雌成蜂感染潜伏期内适时释放。

因绝大多数昆虫天敌、微生物天敌都具有较好的寄主选择性和专化性，对高等动植物无毒害作用且不会造成环境污染，在农林业害虫的生物防治中备受关注(梁建根和郑经武, 2010)。目前，在园林植物害虫防治方面有了成功的案例(权俊娇等, 2014)。但是，利用天敌昆虫或昆虫病原微生物防治害虫时，往往会受到多种外界环境因子的影响，例如降雨等恶劣天气，施药时和施药后的温度、湿度及风等因子的影响，防治效果不稳定，不同区域的施药效果也有所不同，甚至有的药剂在实际施用过程中很有可能接触不到虫体，难以达到预期防效(徐克勤等, 2002)。同样，在林间单一使用寄生蜂或白僵菌时，也会遇到了一些难题，如寄生蜂释放时间与天牛(幼虫或蛹)生长发育时期错位，当它们寄生大型天牛时，往往会遭遇天牛攻击致死，如遇到即将羽化的天牛蛹时，成功寄生率很低。另一方面，白僵菌针对半封闭天牛蛹室内的幼虫或蛹的侵染成功率较低。因此，利用多种天敌资源联合防控的方法，可以

更加有效地解决单一方法运用的技术瓶颈,从而更加高效、安全和经济地生态防控农林害虫。据报道,管氏肿腿蜂携带球孢白僵菌寄生天牛的死亡率高于单独使用任一方法的防效(王功桂等, 2004; 刘洪剑等, 2007)。此外,杨毅(2005)和胡中成等(2007)的研究表明,利用肿腿蜂科的另一种昆虫——川硬皮肿腿蜂 *Scleroderma sichuanensis* Xiao,携带球包白僵菌主动感染松墨天牛幼虫的设想是可行的,同样也是借助了该寄生蜂搜索能力强、个体小、易打破天牛幼虫或蛹的生态防线达到天牛体表等特点,并且推测白僵菌在肿腿蜂搜索途径中随意散落,将成为"寄生蜂-天牛等蛀干害虫-寄主植物"共栖环境中的潜在致病因子(杨毅, 2005;胡中成等, 2007)。

就携菌载体的筛选而言,管氏肿腿蜂的雌成蜂是一种很好的活动载体。因为其雌成蜂具备个体小,寿命长,活动力强,善于爬行和钻蛀,能有效搜索隐匿栖境中的寄主等优势条件(严静君等, 1989; Li *et al*., 2009),是携菌寄生天牛等蛀干害虫的最佳"生物导弹"。本研究系统观察管氏肿腿蜂雌成蜂携菌后感染情况时发现,接触球孢白僵菌孢悬液和孢子粉为 2 ~3 d 后,雌成蜂开始出现感染现象;接菌 6 d 后才出现完全致死的情况($1.0 \times 10^8 \sim 1.0 \times 10^6$ 孢子/mL 孢悬液对雌成蜂的致死率为 100%),且孢悬液对膜翅目昆虫的致死率、感染率与浓度呈正相关,该结果同范丽华等实验结果相一致(范丽华等, 2005)。可见,在利用雌成蜂携菌联防天牛等蛀干害虫时,应在携菌后的感染潜伏期 4 ~5 d 内适时释放。但是,在利用该联防技术实际应用之前,还应明确寄生蜂携菌的量或浓度等关键要素。因此,今后研究还将进一步明确雌成蜂携菌的最佳浓度及其随后对天牛幼虫或蛹等寄主的寄生效果,以及携菌后对寄生蜂生殖、子代发育的影响,从而能更好地综合评定寄生蜂携菌联合防控技术及其实际效果。

参考文献(References)

Fan LH, Xie YP, Yuan GS, Niu Y, 2005. Application of the muscardine, *Beauveria bassiana* against *Diprion jingyuanensis*. *Forest Pest and Disease*, 24(4): 29 -32. [范丽华, 谢映平, 原贵生, 牛宇, 2005. 应用白僵菌防治靖远松叶蜂的研究. 中国森林病虫, 24(4): 29 -32]

He K, Xu ZQ, Dai PL, 2006. The parasitizing behavior of *Scleroderma guani* Xiao *et* Wu (Hymenoptera: Bethylidae) wasps on *Tenebrio molitor* pupae. *Acta Entomologica Sinica*, 49(3): 454 -460. [贺凯, 徐志强, 代平礼, 2006. 管氏肿腿蜂对黄粉甲的寄生行为. 昆虫学报, 49(3): 454 -460]

Hu ZC, Yang Y, Ma LJ, Sun ST, 2007. Experiment on *Monochamus alternatus* infected by *Beauveria bassiana* carried by *Scleroderma sichuanens*. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 27(3): 48 -50. [胡中成, 杨毅, 马良进, 孙素婷, 2007. 川硬皮肿腿蜂携带白僵菌主动传染松墨天牛探索试验. 浙江林业科技, 27(3): 48 -50]

Hu ZR, Wu XY, Zhang ZN, Han ZQ, Zhao CX, 2014. The research advance on biological control of *Scleroderma guani*. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 41(3): 225 -232. [胡尊瑞, 吴晓云, 张翌楠, 韩振芹, 赵晨霞, 2014. 管氏肿腿蜂生物防治研究进展. 福建林业科技, 41(3): 225 -232]

Li JQ, Zhang YA, Mei ZX, Shi DL, 2006. Pathogenicity of entomogenous fungi proteins to *Monochamus alternatus*. *Journal of Fujian College of Forestry*, 26(2): 165 -168. [李建庆, 张永安, 梅增霞, 石东里, 2006. 白僵菌和绿僵菌蛋白对松墨天牛致病性的研究. 福建林学院学报, 26(2): 165 -168]

Li L, Daniel RM, Sun JH, 2009. The influence of prior experience on preference and performance of a cryptoparasitoid *Scleroderma guani* (Hymenoptera: Bethylidae) on beetle hosts. *Ecol. Entomol*., 34: 725 -734.

Li L, Liu ZD, Sun JH, 2015. Olfactory cues in host and host-plant recognition of a polyphagous ectoparasitoid *Scleroderma guani*. *BioControl*, 60: 307 -316.

Liang JG, Zheng JW, 2010. Advances of studies on biological control of vegetable root-knot nematode in installation cultivation. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 26(19): 290 -293. [梁建根, 郑经武, 2010. 设施栽培中蔬菜根结线虫生物防治研究进展. 中国农学通报, 26(19): 290 -293]

Lin XC, 2015. A review of the harm and prevention and control measures were nematode. *East China Forest Management*, 29(3): 28 -30. [林孝春, 2015. 松材线虫病的危害及防控措施综述. 华东森林经理, 29(3): 28 -30]

Liu HJ, Piao CG, Wang LF, Shin SC, Zheng RZ, Shu QL, 2007. Biocontrol of *Monochamus alternatus* by *Beauveria bassiana* and *Scleroderma guani*. *Scientia Silvae Sinicae*, 43(5): 64 -68. [刘洪剑, 朴春根, 汪来发, 申相澈, 郑荣镇, 束庆龙, 2007. 白僵菌和肿腿蜂对松墨天牛幼虫的作用. 林业科学, 43(5): 64 -68]

Nong XQ, Zhang ZH, 2013. Ecological adaptability of entomopathogenic fungi and strategy for biocontrol application. *Chinese Journal of Biological Control*, 29(1): 133 -141. [农向群, 张泽华, 2013. 昆虫病原真菌的生态适应性及其生物防治应用策略. 中国生物防治学报, 29(1): 133 -141]

Quan JJ, Ma X, Liu YY, Guo YC, Lu XP, Li B, Wang B, 2014. Progress of biological control pests in horticultural plants. *Tianjin Agricultural Sciences*, 20(1): 102 -108. [权俊娇, 马行, 刘莹莹, 过昱辰, 陆小平, 李兵, 王波, 2014. 园艺植物害虫生物防治研究进展. 天津农业科学, 20(1): 102 -108]

Wang GG, Zhou LH, Wang CX, Ma DJ, Lu B, 2004. Techniques of using *Scleroderma guani* against *Monochamus alternatus*. *Forest Pests and Diseases*, 23(3): 32 -34. [王功桂, 周灵会, 王长旭, 马德

君，卢斌，2004. 管氏肿腿蜂防治松墨天牛技术. 中国森林病虫，23(3)：32－34]

Wang SB, Fan MZ, Li ZZ, Huang YP, 2003. Advance in research on natural microbial enemies of *Monochamus alternatus*. *Entomological Knowledge*, 40(4)：303－307.［王四宝，樊美珍，李增智，黄勇平，2003. 松褐天牛天敌微生物的研究进展. 昆虫知识，40(4)：303－307]

Xu KQ, Xu FY, Wang MM, Zhao JL, Jiang QG, Zhang P, Xu D, He RQ, Jiang XG, 2002. The techniques of *Scleroderma guani* Xiao *et* Wu to control pine sawyer beetles. *Journal of Nanjing Forestry University* (*Natural Science Edition*), 26(3)：48－52.［徐克勤，徐福元，王敏敏，赵菊林，蒋巧根，张培，胥东，何荣钦，蒋晓庚，2002. 应用管氏肿腿蜂防治松褐天牛. 南京林业大学学报(自然科学版)，26(3)：48－52]

Yan JJ, Xu CH, Li GW, 1989. Forest Pest Natural Enemy Insects. China Forestry Publishing House, Beijing. 161－163.［严静君，徐崇华，李广武，1989. 林木害虫天敌昆虫. 北京：中国林业出版社. 161－163]

Yang Y, 2005. Study on Screening Superior Strain of *Beauveria bassiana* to *Monochamus alternatus* and Exploring the Mechanism Diffused Voluntarily by *Scleroderma sichuanens* Xiao. MSc Thesis, Sichuan Agricultural University, Chengdu.［杨毅，2005. 寄生松墨天牛的白僵菌优良菌株筛选及利用肿腿蜂带菌主动传染机制的探索. 成都：四川农业大学硕士学位论文]

Zhang LY, Zhang XX, 2011. Research progress of biological control of *Monochamus alternatus*. *Shaanxi Forest Science and Technology*, 20(3)：33－36.［张龙渊，张旭晓，2011. 我国松墨天牛生物防治研究进展. 陕西林业科技，20(3)：33－36]

（责任编辑：赵利辉）